

Essai de modélisation de l'exploitation des étangs de la Dombes (Ain, France) *

par

Pierre KÜFFER ^{1,2}, Roger ARDITI ², Laurence BÉRARD ³
et Philippe MARCHENAY ⁴

Avec 5 figures et 3 tableaux

ABSTRACT

Tentative modelling of the exploitation system of the ponds of Dombes (Ain, France).

— The Dombes is a region in the Ain department, in the centre of which are many artificial large ponds. These ponds are alternately exploited dry or flooded. The water phase ('évolage') lasts from two to six years and is mostly devoted to the raising of carp, tench, pike and whitefish. The yearly fishing is accomplished by emptying the pond. The dry phase ('assec') lasts one or two years and is devoted to the culture of oats, wheat, or maize. Two types of models are presented. The first one is an eco-energetical model, which describes the energy fluxes of the system in a stationary state. The energetical cost of the food production of this ecosystem can be estimated. It is shown that the energetical efficiency in this system is higher than in normal agricultural systems. The second model is of a dynamic type. It describes the temporal variations of the system variables during the water phase. Six compartments are considered: phytoplankton, zooplankton, fish, detritus, sediment, and mineral nitrogen. The dynamics of these six state variables is governed by a system of differential equations. The analytical form of the interactions, and the values of the parameters are taken from the literature. After simulating seven years, it is possible to compare the predictions of the model to the real productions. The match is not perfect but qualitatively good. The model correctly predicts a gradual decrease of the yield during the water phase.

* Poster présenté à l'assemblée annuelle de la Société Suisse de Zoologie, Berne, 11-12 mars 1983.

¹ Adresse actuelle: Institut de physiologie, rue du Bugnon 7, CH-1011 Lausanne.

² Institut de zoologie et d'écologie animale, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne.

³ CNRS, Musée Dauphinois, Grenoble.

⁴ CNRS, ERA 773, Muséum national d'histoire naturelle, Paris.

INTRODUCTION

La Dombes est un plateau d'origine glaciaire situé dans le département de l'Ain (France). Au centre de ce plateau se trouve une région de 900 km² occupée par de nombreux étangs artificiels. Ces étangs, exploités alternativement en eau et en assec, produisent selon les années du poisson ou des céréales. L'objet de ce travail est la modélisation de ce système d'exploitation agro-piscicole, plus particulièrement sous l'angle de la production alimentaire, afin d'en décrire le fonctionnement et d'en simuler la dynamique.

D'une altitude moyenne de 280 m, cette région possède un climat de type rhodanien à nuance continentale. A Marlieux, la température moyenne pour la période 1964-1977 est de 19° C en juillet (maximum absolu 36,9° C) et de 2° C en janvier (minimum absolu -23° C). L'insolation annuelle moyenne pour cette période est de 2000 h. Le régime des précipitations pour la période 1972-1982 atteint la moyenne annuelle de 883 mm.

La physionomie des étangs dombistes varie beaucoup selon leur végétation, leur profondeur et leur mode d'exploitation. Leur superficie oscille entre quelques hectares et une centaine. La profondeur est de 1 à 2 m vers la tête, à l'emplacement de la chaussée (digue), et de quelques centimètres à la queue et vers les rives.

Aucun cours d'eau important ne traversant la région, les étangs sont alimentés par un réseau de fossés qui canalisent les eaux de ruissellement provenant des terres cultivées du bassin versant et les eaux de vidange des étangs supérieurs et mitoyens. Lorsque la pente est importante, les étangs sont disposés en chapelet dans l'alignement d'un thalweg. Une seule chaussée sépare la tête de l'étang supérieur de la queue de l'étang inférieur qui doit alors accepter les eaux sans pouvoir les détourner.

L'origine des étangs est très ancienne puisqu'on en trouve la trace dans les textes dès le 13^e siècle. Rédigée en 1524, la « Coutume de Villars » précise un certain nombre de règles ayant trait à la création et au fonctionnement des étangs. Ce texte sera repris et complété par différents auteurs et en particulier RIVOIRE & TRUCHELOT (1881) qui expliquent ainsi les conditions dans lesquelles ce système a pu être mis en place: « Il était loisible à tout le monde de construire un étang sur son terrain. Mais le propriétaire de la chaussée devait traiter avec ses voisins dont il inondait le terrain, soit en achetant leur fonds, soit en faisant des échanges, mais plus généralement, en payant les deux tiers de la valeur du terrain, et se soumettant d'abandonner ce même sol, la troisième année, aux propriétaires, pour le semer à leur profit. »

FONCTIONNEMENT DU SYSTÈME D'EXPLOITATION DES ÉTANGS

Chaque étang possède un fossé de vidange et généralement un ou plusieurs fossés d'arrivée d'eau. Dans de nombreux cas celle-ci peut être détournée par une rivière de ceinture. Les eaux superflues sont évacuées par un trop-plein: l'ébie. Aucun étang ne pourrait se remplir ni se vider sans l'existence de ces multiples fossés qui communiquent entre eux, récupèrent les eaux de ruissellement et forment, dans chaque commune, un réseau hydrographique d'une complexité variable selon sa topographie, l'importance de la pente, le nombre et la taille des étangs.

Lors de l'évolage, un nombre important d'étangs reçoit du fumier ou du lisier en automne (500 à 1000 kg/ha). Certains exploitants utilisent des engrais phosphatés

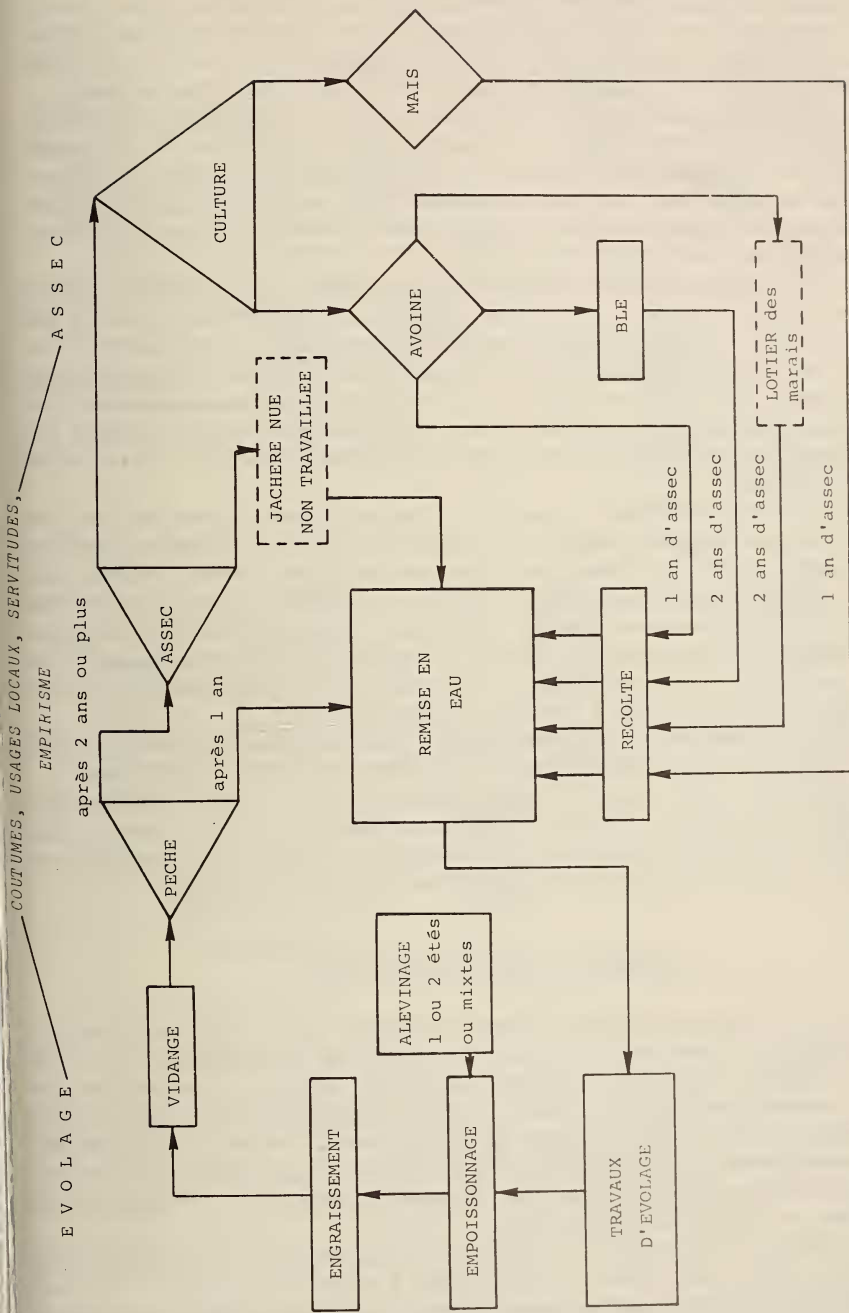


FIG. 1. — Cycles et options possibles d'assolement pratiqués dans les étangs, exploités successivement en eau et en assec. L'évolage (période d'exploitation en eau) s'étend en moyenne sur quatre ans, avec une pêche chaque année. L'assec lui succède pour une durée d'un à deux ans.

(300 kg/ha) ou des superphosphates (150 kg/ha). La teneur du sol en calcaire est voisine de zéro. En juin, les étangs peuvent recevoir du calcaire broyé (1 à 2 t/ha).

Les étangs produisent des carpes (*Cyprinus carpio* L.) et des tanches (*Tinca tinca* L.) qui sont commercialisées après 3 ans, ainsi que du blanc (rotengles *Scardinius erythrophthalmus* L. et gardons *Leuciscus rutilus* L.) et des brochets (*Esox lucius* L.). Les exploitants élèvent eux-mêmes les alevins de carpes dans de petits étangs peu profonds.

Les chiffres d'empeisonnage sont établis avec précision et dépendent des caractéristiques du fond. Les quantités introduites à l'hectare sont en moyenne de 100 à 150 panots (carpes de 2 étés), 10 à 20 kg de tanchons, 15 à 30 kg de blanc et 10 à 20 têtes de brochets. Les alevins de tanches, blanc et brochets sont prélevés en cours de pêche et immédiatement reversés dans l'étang d'exploitation. Les panots, provenant d'étangs d'alevinage, sont introduits plus tard dans l'année.

La pêche annuelle se fait par vidange complète de l'étang. Le moment venu, l'exploitant ouvre le thou (vanne) et vide partiellement l'étang de manière à ce que seul le bief (fossé creusé dans la partie basse de l'étang) soit encore en eau. Les poissons s'y regroupent. Les pêcheurs groupés en deux équipes de part et d'autre du bief tirent les filets de manière à rabattre le poisson vers le bord. En moins de quatre heures, une équipe d'une vingtaine d'hommes peut pêcher, trier et peser les tonnes de poissons que fournit l'étang. Les rendements habituels des étangs dombistes sont de l'ordre de 200 à 250 kg par hectare.

Après la période d'évolage de quatre à six ans en moyenne, l'étang est mis à sec pour être cultivé. Il est alors labouré avant que le fond ne forme une couche trop dure. Lors de l'assec, le bief est dégagé car il s'envase rapidement durant l'évolage. Les cultures les plus fréquentes sont le maïs et l'avoine. La culture du blé, plus rare, ne peut se faire qu'en deuxième année d'assec, cette céréale devant être semée en automne. Les rendements en avoine peuvent atteindre 25 quintaux à l'hectare au cours d'une bonne année et être pratiquement nuls si les conditions sont mauvaises. En maïs, ils varient entre 50 et 80 quintaux à l'hectare, et en blé entre 25 et 50.

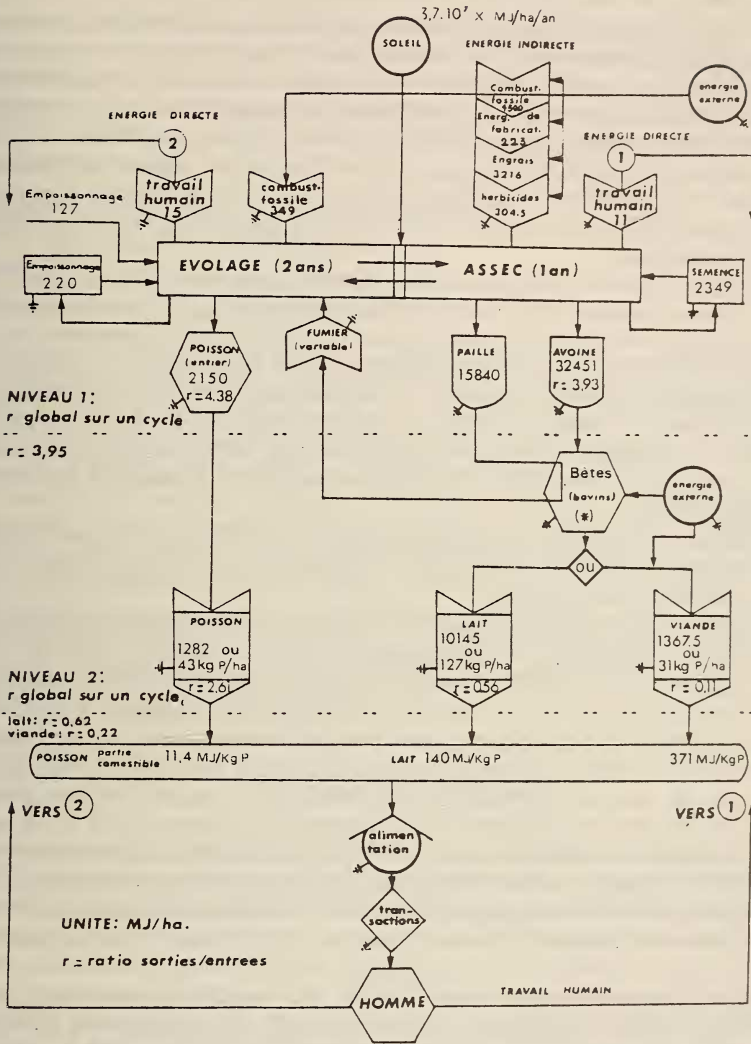
La figure 1 schématise le fonctionnement du système intégrant les phases d'évolage et d'assec, avec les différentes possibilités d'assolement pratiquées dans les étangs.

Dans ce travail, deux types de modèles sont présentés. Le premier est un modèle éco-énergétique qui décrit le fonctionnement de l'ensemble du système dans un état stationnaire sous l'angle particulier des flux d'énergie. Le second est un modèle dynamique qui décrit les fluctuations temporelles des variables du système.

MODÈLE ÉCO-ÉNERGÉTIQUE

Jusqu'à une époque relativement récente, les travaux traitant à la fois de l'écologie et de l'énergétique concernaient principalement l'étude des flux d'énergie le long des chaînes trophiques, pour des populations déterminées d'espèces animales dans des systèmes naturels. Les problèmes actuels d'approvisionnement en énergie de même que l'intérêt croissant porté aux systèmes agro-alimentaires ont amené le développement d'une nouvelle tendance qui étudie la totalité de la circulation de l'énergie dans les écosystèmes modifiés par l'homme, notamment les agro-écosystèmes (p. ex. PIMENTEL *et al.* 1973; VIEIRA DA SILVA & SOUCHON 1977).

Une analyse éco-énergétique du système des étangs dombistes a été effectuée par MARCHENAY (1979). Ce modèle, dont la figure 2 présente l'application à l'étang Grand-Glareins, cherche à estimer le coût énergétique de la production alimentaire que fournit cet écosystème. L'analyse éco-énergétique s'efforce en effet d'identifier toutes



Symboles utilisés :









- | | | | | | |
|--|---|---|--|---|-------------------------|
|  | Transformation de l'énergie (productivité secondaire, denrées alimentaires) |  | Pertes |  | Productivité primaire |
|  | Stockage d'énergie |  | Entrées d'énergie (travail et combustible fossile) |  | Productivité secondaire |
|  | Transactions |  | Entrées d'énergie initiale (alevins ou semence) | | |

FIG. 2.

Flux d'énergie dans l'agro-écosystème de l'étang Grand-Glareins. (1 an d'assec, 2 ans d'eau. Culture: avoine). Le bilan *brut* est calculé à partir des productions obtenues par l'exploitant. Le bilan *net* tient compte des transformations ultérieures nécessaires pour l'alimentation humaine. Ainsi, les céréales servant à l'alimentation du bétail sont transformées en lait et viande.

les sources et consommations d'énergie et leurs transferts le long des chaînes de production.

Les informations concernant les entrées et sorties ont été obtenues par des enquêtes menées auprès des exploitants. Les données concernant le travail, la consommation de combustible, l'utilisation d'engrais et d'herbicides sont assez constantes d'année en année sur une période de dix ans, tandis que les productions sont plus irrégulières. Toutes les valeurs utilisées dans le modèle sont des moyennes sur 10 ans.

Les entrées d'énergie dans le système sont multiples et pas toujours faciles à mesurer. Le soleil est à la base de tout écosystème. Il représente la source d'énergie la plus importante, mais étant inépuisable et gratuit, il ne sera pas comptabilisé dans le coût énergétique des productions.

Le travail humain est nécessaire à l'entretien et à l'exploitation du système (labours, moissons, pêches, entretien des fossés). L'énergie dépensée par l'homme pour ce travail est estimée par la fraction de la ration alimentaire effectivement transformée en travail. Elle est de 1254 kJ/h pour un travail agricole moyen (PASSMORE *et al.* 1974).

Les machines agricoles nécessaires à l'exploitant fournissent de l'énergie mécanique au système et consomment du combustible fossile pour leur fonctionnement et leur fabrication (PIMENTEL *et al.* 1973; DELÉAGE *et al.* 1977). Les engrais et herbicides sont représentés dans le système par la dépense énergétique nécessaire à leur obtention (MARCHENAY 1979).

Les sorties du système sont essentiellement constituées par des productions de poisson, céréales et paille. Leur contenu en énergie est estimé par leur valeur calorique, mesurée en bombe calorimétrique.

Un budget « brut » peut être calculé à partir des sorties telles que l'exploitant les obtient sans les transformer. Le rendement brut sera le rapport entre la quantité d'énergie extraite et la quantité d'énergie introduite dans le système. L'énergie produite et réintroduite sous forme d'alevins ou de semences appartient à la circulation interne du système et n'intervient pas dans le calcul du rendement. Les empoisonnages de carpes figurent comme une énergie introduite car elles sont élevées dans des étangs spéciaux, dits de pose ou d'alevinage, qui produisent les « panots » de deux étés. Dans l'exemple de l'étang Grand-Glareins, la production de poissons, après avoir retiré la fraction nécessaire au réempoisonnage s'élève à 1075 MJ/ha/an avec un rendement brut de 4,38. En assec, la culture de l'avoine, après prélèvement des semences, produit 32'451 MJ/ha/an avec un rendement brut de 3,93. Le rendement sur un cycle complet, formé de deux ans d'évolage et d'un an d'assec est de 3,95 (sans la paille, laissée sur le terrain).

Mais les étangs dombistes ayant d'abord une vocation alimentaire, il est plus intéressant de calculer un budget « net » sur la base de la production effectivement consommée par l'homme. En Dombes, les céréales subissent une nouvelle transformation comme nourriture pour le bétail, soit pour la production de lait, soit pour la production de viande. Par ailleurs, seule une partie du poisson est propre à la consommation humaine. Dans l'étang Grand-Glareins, la production nette de l'évolage est de 641 MJ/ha/an en poisson (partie comestible), avec un rendement net de 2,61. Lors de l'assec, la production est de 10'145 MJ/ha/an avec une option « lait », ou de 1368 MJ/ha/an avec une option « viande ». Les rendements nets de l'assec sont de 0,56 pour le lait ou de 0,11 pour la viande. Les rendements nets ainsi calculés restent approximatifs dans la mesure où le régime alimentaire du bétail ne peut être constitué uniquement des céréales et du fourrage ensilés.

En ce qui concerne le rendement en protéines, les productions nettes sont de 22 kg/ha/an sous forme de poisson comestible lors de l'évolage, et de 127 kg/ha/an

sous forme de lait, ou de 31 kg/ha/an sous forme de viande, lors de l'assec. Les coûts énergétiques par kg de protéines produites sont respectivement de 11,4 MJ/kg pour le poisson, de 140 MJ/kg pour le lait et de 371 MJ/kg pour la viande.

La production à l'hectare, en période d'assec, est inférieure de 10 à 20% à celle des terres avoisinantes. En contrepartie, le rendement énergétique de l'étang cultivé est plus intéressant. Les comparaisons manquent, mais on peut citer à titre indicatif quelques rendements énergétiques bruts, à comparer au chiffre de 3,93 obtenu pour l'avoine dans l'étang Grand-Glareins :

Maïs-grain, Etats-Unis: 2,82 (PIMENTEL *et al.* 1973)

Maïs-grain, Angleterre: 2,32 (LEACH 1976)

Maïs-grain, France: 3,20 (MERCIER 1978)

Avoine, France: 3,40 (MERCIER 1978)

L'évolage, qui nécessite un apport énergétique particulièrement faible (peu de travail mécanique, pas d'engrais), présente un rendement énergétique très élevé. Nous avons vu que l'étang Grand-Glareins assure un rendement brut de 4,38 et un rendement net de 2,61. Il est spectaculaire de comparer ces chiffres à ceux obtenus par LEACH (1976) ou ANGELIDIS (1978) pour la pêche en mer: respectivement 0,05 et 0,07.

L'analyse éco-énergétique permet de comparer différents agro-écosystèmes du point de vue de leur rendement énergétique. Elle fournit ainsi une base de comparaison indépendante des problèmes économiques et monétaires spécifiques à chaque pays, ce qui la rend utilisable à très large échelle. Mais elle ne peut bien s'appliquer qu'à des systèmes à l'état stationnaire et n'a qu'une faible valeur prédictive. Elle ne peut répondre à des questions concernant la dynamique du système comme, par exemple, ce qui se passerait si le cycle évolage-assec était modifié. Le second modèle présenté dans ce travail tente de fournir un outil prédictif.

MODÈLE DYNAMIQUE

Comme nous disposons de fort peu de données quantitatives relatives aux variables biologiques des étangs, nous avons décidé de n'obtenir aucun paramètre par calibration. Ceci nous a contraints à élaborer un modèle suffisamment détaillé pour pouvoir y incorporer des constituants connus par des études sur d'autres systèmes. Il existe en effet une abondante littérature sur la modélisation des écosystèmes aquatiques, parmi laquelle on peut citer les travaux bien documentés de CHEN & ORLOB (1975), DI TORO *et al.* (1977), JØRGENSEN (1976, 1980), JØRGENSEN *et al.* (1978), NYHOLM (1978), SCAVIA (1980), SCAVIA & PARK (1976), THOMANN *et al.* (1975). Une comparaison de nombreux modèles a été faite par SWARTZMAN (1979) et SWARTZMAN & BENTLEY (1979).

Le modèle comprend six compartiments (Fig. 3): phytoplancton, zooplancton, poisson, détritus, sédiment et azote minéral. Nous n'avons considéré que ce nutriment du phytoplancton car c'est le seul qui soit limitant dans le cas des étangs de la Dombes (BALVAY 1980). Les six variables sont exprimées en milligrammes d'azote par litre d'eau. Pour des raisons d'homogénéité, cette unité est également adoptée pour le sédiment. Sa concentration réelle au fond, par unité de surface, s'obtient facilement en multipliant par la profondeur de l'étang.

Il est fait l'hypothèse que l'ensemble des espèces constituant le phytoplancton sont consommées par le zooplancton. En effet, l'apparition d'espèces non consommables, telles les fleurs d'eau, est un phénomène rare que les exploitants s'efforcent d'éviter.

De même, l'ensemble du zooplancton est supposé être consommable par les poissons. Inversement, ces derniers sont supposés être uniquement planctivores, les poissons prédateurs (brochets) étant négligés. Le « détritux » comprend le détritux organique en suspension et la couche superficielle du sédiment.

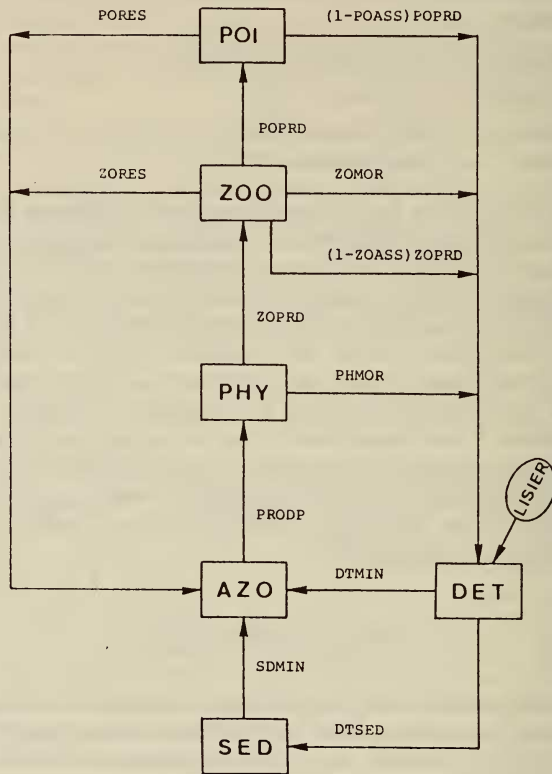


FIG. 3.

Modèle du cycle de l'azote. Les six compartiments sont : phytoplancton, zooplancton, poisson, détritux, sédiment et azote minéral. Dans les étangs de la Dombes, l'azote minéral est le seul nutriment limitant du phytoplancton.

La dynamique du modèle est régie par le système de six équations différentielles du premier ordre illustrées par la figure 3. La signification des flux représentés par les flèches est la suivante. PRODP est la production primaire nette. Il n'y a donc pas de respiration du phytoplancton. ZORES et PORES sont les respirations du zooplancton et du poisson. PHMOR et ZOMOR sont les mortalités. PHMOR comprend également la sédimentation du phytoplancton. Aucune mortalité n'est prévue pour le poisson car, normalement, celui-ci ne fait que croître au cours de l'année d'exploitation, à l'issue de laquelle il est intégralement pêché. ZOPRD et POPRD sont les prédateurs,

PRODUCTION PRIMAIRE

$$PRODP = PPMAX * PPLUM * PPAZO * PPTMP * PHY$$

$$\text{où } PPLUM = \frac{1}{PROF * EXT} \cdot \ln \frac{RAY(t) + RAYK}{RAY(t) e^{-PROF * EXT} + RAYK}$$

$$EXT = EXT0 + EXT1 * PHY$$

$$PPAZO = \frac{AZO}{AZO + AZOK}$$

MORTALITES

$$PHMOR = PHMORT * PMTMP * PHY$$

$$ZOMOR = ZOMORT * ZMTMP * ZOO$$

RESPIRATIONS

$$ZORES = ZORESP * ZRTMP * ZOO$$

$$PORES = PORESP * PRTMP * POI$$

PREDATIONS

$$ZOPRD = ZPMAX * \frac{PHY}{PHY + PHYK} * ZPTMP * ZOO$$

$$POP RD = PZMAX * \frac{ZOO}{ZOO + ZOOK} * PZTMP * POI$$

SEDIMENTATION

$$DTS' = (DETSED / PROF) * DET$$

MINERALISATIONS

$$DTMIN = DETMIN * DMTMP * DET$$

$$SDMIN = SEDMIN * SMTMP * DTSED$$

INFLUENCE DE LA TEMPERATURE (loi de Van't Hoff)

$$xxTMP = TH_{xx}^{(TMP(t) - 20)} \quad (xx = PP, PM, ZM, ZR, PR, ZP, PZ, DM, SM)$$

TABLEAU 1.

Expression détaillée du modèle. Les quantités en italiques sont les paramètres et les variables exogènes.

et POASS étant les taux d'assimilation. Enfin, les flux DTSED, DTMIN et SDMIN représentent la sédimentation du détritus, la minéralisation du détritus et celle du sédiment.

Le tableau 1 donne l'expression détaillée de tous les flux, les quantités en italiques étant les paramètres et les variables exogènes. Nous avons adopté des interactions de type multiplicatif lorsque plusieurs facteurs agissent en même temps. La température agit selon la loi de Van't Hoff sur tous les flux, à l'exception de la sédimentation du détritus.

Les consommations (prédateurs du poisson et du zooplancton, absorption d'azote par le phytoplancton) sont supposées répondre à la cinétique de Michaelis-Menten qui limite la quantité consommée $f(x)$ à une valeur de saturation f_{\max} :

$$f(x) = f_{\max} \frac{x}{x + xk}, \quad (1)$$

où x est la densité de l'aliment et xk la densité de demi-saturation. Cette loi est celle qui est adoptée par la quasi-totalité des modèles de simulation des systèmes hydrobiologiques.

Cette même loi est adoptée pour l'influence du rayonnement lumineux sur la photosynthèse (loi de Baly)

$$f(I) = \frac{I}{I + \text{RAYK}}. \quad (2)$$

Mais l'intensité lumineuse I s'atténue avec la profondeur selon la loi de Beer

$$I(z) = \text{RAY} e^{-\text{EXT} \cdot z}, \quad (3)$$

où RAY est l'intensité du rayonnement transmis à la surface de l'eau, et EXT est le coefficient d'extinction. Ce dernier est supposé recevoir deux contributions; l'une constante, due à l'eau, et l'autre proportionnelle à la concentration de phytoplancton (auto-ombrage).

En supposant que le phytoplancton soit distribué verticalement de façon uniforme, il est nécessaire de faire une moyenne de (2) en calculant l'expression

$$\text{PPLUM} = \frac{1}{\text{PROF}} \int_0^{\text{PROF}} f(I(z)) dz, \quad (4)$$

dont la forme explicite figure au tableau 1.

La loi de Baly est assez largement utilisée, mais certains lui préfèrent la loi de STEELE (1962) qui décrit une chute de la productivité au-delà d'une intensité lumineuse optimale. Bien que ce phénomène soit exact pour chaque espèce d'algue prise séparément, il est vraisemblable que la composition du phytoplancton soit telle qu'il se trouve toujours une espèce pour exploiter au mieux le rayonnement disponible, la réponse résultante ne montrant alors plus de chute de la productivité.

La minéralisation du sédiment est d'une structure différente des autres processus. L'expression adoptée a été proposée par NYHOLM (1978) pour rendre compte du fait que ce taux de minéralisation est positivement corrélé à la température et à la sédimentation. Ceci permet d'éviter de devoir décrire de façon détaillée les processus internes au sédiment.

Paramètre	Valeur	Source
PROF	1,2 m	estimation moyenne
PPMAX	2,5 jour ⁻¹	Thomann et al. 1975, Di Toro et al. 1977, Scavia 1980, Handbook A57,A131
RAYK	1003 J cm ⁻² jour ⁻¹	Tiwari 1978
EXTØ	0,27 m ⁻¹	Jørgensen 1980
EXT1	6,0 mg ⁻¹ m ⁻¹	Jørgensen 1980
PHMORT	0,1 jour ⁻¹	Handbook A72
ZOMORT	0,005 jour ⁻¹	Handbook A458
ZOESP	0,02 jour ⁻¹	Handbook A471, Chen & Orlob 1975
PORESP	0,002 jour ⁻¹	Handbook A222
DETMIN	0,2 jour ⁻¹	Handbook G104, Jørgensen 1980
SEDMIN	1,0	Nyholm 1978
DETSER	0,003 m jour ⁻¹	Jørgensen et al. 1978, Handbook A202
ZPMAX	0,36 jour ⁻¹	Jørgensen et al. 1978, Handbook A440
PZMAX	0,14 jour ⁻¹	d'après Handbook A215
AZOK	0,2 mg l ⁻¹	Jørgensen et al. 1978, Handbook A48
PHYK	0,2 mg l ⁻¹	Jørgensen et al. 1978, Swartzman & Bentley 1979
ZOOK	0,35 mg l ⁻¹	Jørgensen et al. 1978
ZOASS	0,6	Handbook A203
POASS	0,4	Handbook A203
THPP	1,082	Handbook A131
THSM	1,14	Nyholm 1978
THPM		
THZM		
THZR		
THPR	1,045	Di Toro et al. 1977
THZP		
THPZ		
THDM		
Teneurs en azote		
phytopl.	7,0 N/chloro a	Handbook A75
phytopl.	0,08 N/poids sec	Handbook A74
zoopl.	0,008 N/poids sec	Handbook A459
poisson	0,11 N/poids sec	Handbook A218
poisson	0,026 N/pds humide	Handbook A217

TABLEAU 2.
Valeurs des paramètres.

SIMULATIONS

Pour la plupart des paramètres, nous ne disposions pas de valeurs mesurées sur le terrain. C'est pourquoi il a fallu adopter des estimations tirées de la littérature, en comparant de nombreuses sources. Certains paramètres peuvent varier de façon relativement importante selon les auteurs et nous avons dû quelquefois faire un choix, nous efforçant d'adopter les valeurs les plus largement utilisées. Les valeurs finalement adoptées pour les simulations sont énumérées au tableau 2, où seules figurent les sources les plus fréquentes. Le « Handbook » dont il est souvent fait mention est un gros ouvrage

Année	1972	1973	1976	1977	1978	1979	1980
Empoisonnage (kg)	1249	1070	930	955	898	873	948
Empoisonnage (mgN/l)	0,11	0,09	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08
Pêche (kg)	4074	2749	5904	5494	6550	4559	2870
Pêche (mgN/l)	0,32	0,22	0,47	0,44	0,52	0,36	0,23
Lisier (t)	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7	29,7
Lisier (mgN/l)	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

TABLEAU 3.

Données relatives à l'étang du Grand Guerrier (27 ha de superficie, 1,2 m de profondeur moyenne).

édité par JØRGENSEN (1979), qui rassemble un très grand nombre de paramètres recueillis dans la littérature. Comme toutes les concentrations ont été exprimées en azote, il a été nécessaire d'utiliser les facteurs de transformation mentionnés au tableau 2 lorsque les sources utilisaient d'autres unités.

A titre d'exemple, nous avons choisi de simuler l'étang du Grand Guerrier sur la période 1972-1980, les années 1974 et 1975 étant des années d'assec. Le tableau 3 présente les données connues sur cet étang. Les paramètres ayant été fixés (tableau 2), il restait à connaître les variables exogènes et les valeurs initiales des six variables d'état. Concernant les premières, nous disposions des données suivantes: quantité de lisier déversé dans l'étang, températures moyennes à Marlieux et rayonnement solaire global à Mâcon.

Les valeurs initiales du poisson sont évidemment celles de l'empoisonnage. Pour les autres variables, il se posait le problème dû au fait qu'un étang vidé lors de la pêche est rempli par l'eau provenant d'un autre étang ou du bassin versant. Pour simplifier, nous avons pris le cas fictif où l'étang serait rempli par sa propre eau (ou, ce qui revient au même, serait pêché sans être vidé). A l'exception de la première année, les valeurs initiales seront donc déterminées par les valeurs finales de l'année précédente.

La valeur initiale du détritus doit être augmentée de la quantité de lisier de vache déversé dans l'étang (1,1 t/ha), dont la teneur en azote est en moyenne de 1,7 g/kg (G. BALVAY, comm. pers.). Cela représente un apport de 0,16 mgN/l.

Pour 1972, première année de la simulation, nous avons pris des valeurs initiales jugées moyennes: 0,3 pour le sédiment, 0,2 pour l'azote, 0,3 pour le détritus, 0,1 pour le phytoplancton et 0,0005 pour le zooplancton. En 1976, à la remise en eau après l'assec, nous avons fait l'hypothèse que l'étang était rempli par une eau identique à celle de la fin de 1973, à la différence que tout le sédiment est supposé s'être transformé en azote minéral.

Un scénario de valeurs initiales ayant ainsi été fixé pour toutes les années, les simulations sont effectuées séparément pour chaque année avec un pas journalier. La figure 4 donne l'exemple de la première année.

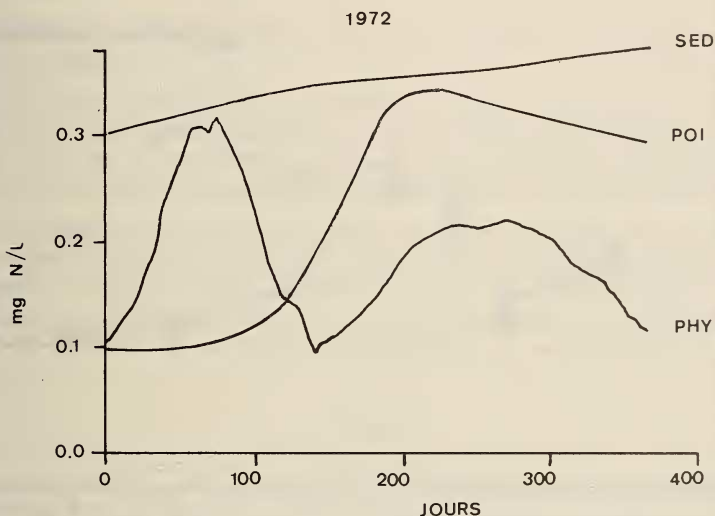


FIG. 4.

Simulation de l'étang du Grand-Guerrier pour l'année 1972.

La biomasse de poisson au 365^e jour est, par définition, la « pêche prédite ».

DISCUSSION

La figure 5 présente la comparaison des valeurs annuelles finales du poisson, et les pêches effectives dans l'étang du Grand-Guerrier (sans le brochet). Compte tenu du nombre d'hypothèses simplificatrices qu'il a fallu faire, il ne fallait pas s'attendre à un accord parfait. Dans ces conditions, il est déjà satisfaisant que les pêches prédites soient du même ordre de grandeur que les pêches réelles. De plus, le modèle rend compte d'un important phénomène: la baisse graduelle des rendements tout au long de l'évolage, et un bond très net après l'assec. Ceci est dû au blocage des nutriments dans le sédiment, et à leur libération lors de la mise en culture.

Il resterait beaucoup à faire pour aboutir à un modèle robuste et fiable. Rappelons qu'aucun paramètre n'a été fixé par calibration. La plupart d'entre eux ont été tirés de la littérature et ne correspondent peut-être pas aux valeurs du système étudié. Des

estimations directes du plus grand nombre possible de paramètres seront les bienvenues. En particulier, ceux relatifs à la prédation du poisson sont mal connus. Il serait alors possible de décrire plus finement le compartiment « poisson », en introduisant par exemple le brochet.

Il conviendrait aussi de donner de l'assec une description moins grossière que celle qui a été adoptée, à savoir une simple minéralisation du sédiment. L'assec s'accompagne

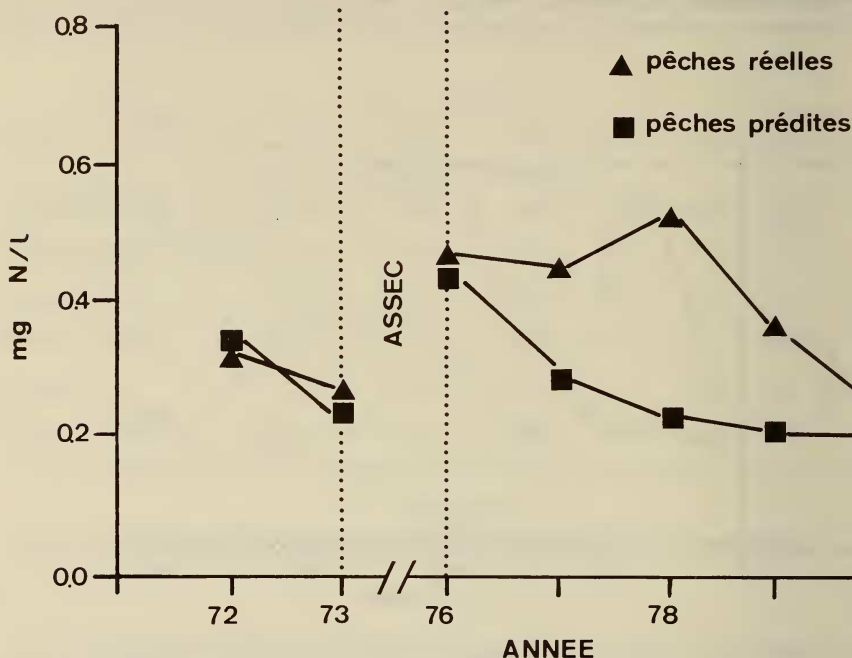


FIG. 5.

Etang du Grand-Guerrier. L'accord entre pêches réelles et pêches prédites n'est pas parfait, mais le modèle rend compte d'un phénomène important: la baisse graduelle des rendements tout au long de l'évolage, et un très net bond après l'assec. Ceci est dû au blocage des nutriments dans le sédiment, et à leur libération lors de la mise en culture.

également d'un apport d'engrais et d'une production de détritus. Si l'on obtient en outre une estimation de la production de l'assec, il serait alors possible d'utiliser le modèle pour trouver la politique d'assolement qui maximiserait la production totale.

Ainsi, par son caractère prédictif, l'approche en simulation dynamique joue un rôle différent mais complémentaire de celui de l'approche éco-énergétique qui, elle, donne une description essentiellement statique. Par là-même, l'analyse éco-énergétique est relativement facile à effectuer puisqu'il suffit de mesurer les flux et niveaux d'énergie et de matière, tels qu'ils existent. L'approche dynamique nécessite en plus la connaissance des lois auxquelles répondent les divers composants du système lorsqu'ils sont

placés dans des situations différentes de celles qui existent. Cette difficulté conduit presque toujours à élaborer un modèle plus simplifié que lors de l'approche éco-énergétique.

Cette dernière permet en revanche de tenir compte d'un grand nombre de composants et donne une vision très complète de la circulation de l'énergie. Dans le cas de la Dombes, elle a montré la grande efficacité du système. Associée à une exploitation agricole, la culture des étangs tend à faire augmenter les rendements énergétiques globaux de manière très sensible, en transformant rapidement une productivité primaire et secondaire élevée en produits alimentaires de valeur pour l'homme. Dans un milieu où la densité humaine est relativement faible, on a là un type d'exploitation extensive très intéressant.

Deux problèmes d'importance vitale vont se poser de façon aiguë au cours des prochaines années :

— Le caractère renouvelable des entrées d'énergie est certainement l'un des plus importants de l'agriculture. L'exemple des étangs nous montre qu'il existe des solutions qui, sans être un retour à une technique révolue, offrent une possibilité de gérer de façon optimale une entreprise basée sur l'exploitation d'une productivité naturelle.

— La désertification des sols est liée aux problèmes énergétiques. Si l'on doit diminuer les apports d'engrais et les coûts énergétiques de combustibles fossiles, il faut trouver des solutions d'urgence pour maintenir la fertilité des terroirs. L'analyse éco-énergétique peut y contribuer efficacement, en même temps que des études poussées sur l'importance de l'humus, sur les cycles bio-géochimiques et notamment celui de l'azote.

RÉSUMÉ

La Dombes est un plateau situé au sud du département de l'Ain, dont le centre est une région d'étangs artificiels, exploités alternativement en eau et en assec. L'exploitation en eau (évolage), qui dure deux à six ans, est consacrée à la pisciculture de carpes, blancs et brochets. En principe, les étangs ne sont pas nourris artificiellement. La pêche annuelle se fait par vidange de l'étang. L'exploitation en assec, qui dure un ou deux ans, est consacrée à la culture de l'avoine, du blé ou du maïs.

Deux types de modèles de ce système sont présentés dans ce travail. Le premier est un modèle éco-énergétique qui décrit le fonctionnement du système dans un état stationnaire, sous l'angle particulier des flux d'énergie. Il permet d'estimer le coût énergétique de la production alimentaire que fournit cet écosystème.

Le second modèle est de type dynamique. Il décrit les fluctuations temporelles des variables du système, lors de l'évolage. Il est constitué des six compartiments phytoplancton, zooplancton, poisson, détritus, sédiment et azote minéral. La dynamique de ces six variables d'état est régie par un système d'équations différentielles. La forme analytique des interactions, ainsi que les valeurs des paramètres, reposent sur des données de la littérature. Après simulation de sept années, il est possible de comparer les productions prédites par le modèle et les productions réelles. L'accord n'est pas parfait mais il est assez bon qualitativement. Le modèle rend compte de la baisse graduelle de rendement au cours de l'évolage.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGELIDIS, M. 1978. Analyse éco-énergétique de la grande pêche. *Mémoire de D.E.A., Laboratoire d'Ecologie Générale et Appliquée, Université Paris 7*, 33 pp.
- BALVAY, G. 1980. Fonctionnement et contrôle du réseau trophique en étang. In: R. BILLARD (éd.), *Actes du Congrès sur la Pisciculture en Etang, Arbonne-la-Forêt*, 11-13 mars 1980: 47-79.
- CHEN, C. W. and G. T. ORLOB. 1975. Ecological simulation for aquatic environments. In: B. C. PATTEN (ed.), *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, vol. 3: 475-588 *Academic Press*.
- DELÉAGE, J. P., N. SAUGET-NAUDIN et C. SOUCHON. 1977. Réflexions méthodologiques sur l'analyse éco-énergétique des systèmes agricoles et agro-alimentaires. *CEGERNA et Université Paris 6, Arc-et-Senans*, 30 pp.
- DI TORO, D. M., R. V. THOMANN, D. J. O'CONNOR and J. L. MANCINI. 1977. Estuarine phytoplankton biomass models — verification analysis and preliminary applications. In: E. D. GOLDBERG (ed.), *Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas: 969-1020*, *Wiley*.
- JØRGENSEN, S. E. 1976. A eutrophication model for a lake. *Ecol. Model.* 2: 147-165.
- (ed.). 1979. Handbook of Environmental Data and Ecological Parameters. *ISEM-Pergamon*, 1162 pp.
- 1980. Lake Management. *Pergamon*, 167 pp.
- JØRGENSEN, S. E., H. MEJER and M. FRIIS. 1978. Examination of a lake model. *Ecol. Model.* 4: 253-278.
- LEACH, G. 1976. Energy and Food Production. *London I.P.C. Sciences and Technology Press Production*.
- MARCHENAY, P. 1979. Flux énergétique dans l'agro-écosystème des étangs de la Dombes (Ain). *Thèse de doctorat de spécialité, Université Paris 7*, 177 pp.
- MERCIER, J. R. 1978. Energie et agriculture: le choix écologique. *Debard, Paris*, 187 pp.
- NYHOLM, N. 1978. A simulation model for phytoplankton growth and nutrient cycling in eutrophic, shallow lakes. *Ecol. Model.* 4: 279-310.
- PASSMORE, R., B. M. NICOL, M. NARAYANA RAO, G. H. BEATON et E. M. DEMAAYER. 1974. Manuel sur les besoins nutritionnels de l'homme. *FAO, Rome*.
- PIMENTEL, D. et al. 1973. Food production and the energy crisis. *Science* 182: 443-449.
- RIVOIRE, C. et A. TRUCHELUT. 1881. Coutumes et usages des étangs de la Dombes et de la Bresse. *Bibliographie des étangs. Authier et Barbier, Bourg-en-Bresse*, 172 pp.
- SCAVIA, D. 1980. An ecological model of Lake Ontario. *Ecol. Model.* 8: 49-78.
- SCAVIA, D. and R. A. PARK. 1976. Documentation of selected constructs and parameter values in the aquatic model CLEANER. *Ecol. Model.* 2: 33-58.
- SWARTZMAN, G. L. 1979. A comparison of plankton simulation models emphasizing their applicability to impact assessment. *J. Envir. Manage.* 9: 145-163.
- SWARTZMAN, G. L. and R. BENTLEY. 1979. A review and comparison of plankton simulation models. *ISEM J.* 1: 30-81.
- THOMANN, R. V., D. M. DI TORO, R. P. WINFIELD and D. J. O'CONNOR. 1975. Mathematical modeling of phytoplankton in Lake Ontario. I. Model development and verification. *U.S. Environmental Protection Agency, EPA-660/3-75-005*, 77 pp.
- TIWARI, J. L., J. E. HOBBIE, J. P. REED, D. W. STANLEY and M. C. MILLER. 1978. Some stochastic differential equation models of an aquatic ecosystem. *Ecol. Model.* 4: 3-27.